

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 極低温原子を用いる量子計測法の開拓

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点)：

研究代表者

香取 秀俊 (東京大学大学院工学系研究科 教授)

主たる共同研究者：

洪 鋒雷 (産業技術総合研究所時間周波数科波長標準研究室 室長)

3. 研究実施概要

極低温原子を用いた新たな量子計測・量子情報処理のツール「光格子時計」、「シュタルク原子チップ」の手法を確立し、その工学的・理学的応用を目指す。特に、「光格子時計」の研究では、Sr、Yb、Hg の原子のうち、2 種以上の原子で 16 桁を上回る相対精度でスペクトルの相互比較を行い、次世代の時間標準としてのフィジビリティを評価するとともに、微細構造定数の恒常性/揺らぎの検証に挑戦することを目標として研究を開始した。この研究プロジェクトの過程で、光格子時計の開発は、世界的な競争の渦に巻き込まれていった。これを受け、研究プロジェクトの 2 年目からは、「シュタルク原子チップ」の研究を半ば停止し、「光格子時計」開発に全力を傾注することとした。

「光格子時計」手法は、本研究代表者が 2001 年に提案した新たな原子時計手法であり、「魔法波長」と名付けた原子に特有なレーザー波長で光トラップを構成すると原子の 2 準位のエネルギーシフトが等しくなることを利用する。魔法波長で構成した光格子トラップに数千から百万個の原子を捕獲し時計遷移を観測することにより、次世代原子時計として最も有望視されていた「単一イオン光時計」に比べて、原理的には数十倍から千倍の安定度の向上が可能になる。2003 年に東大グループで「魔法波長」の実証が行われ、2005 年には東大・産総研グループで「光格子時計」の最初の実証がなされた。

本 CREST 研究の開始直後の 2006 年になると、米国、仏国グループでも光格子時計を実現し、その研究開発は世界で 20 を超えるグループが参入する世界的な潮流となった。

この研究の世界情勢の中で、本研究チームは、光格子時計の原理検証、その量子力学的設計の最適化、適用する原子固有の問題提起とその解明を行い、この原子時計手法の 18 桁の原子時計としてのフィジビリティを検証した。具体的には、

- 原子の量子統計性と光格子の幾何学を考えた光格子時計の最適設計
- Sr、Yb、Hg による異種光格子時計の実現・提案 (Hg)
- 多重極相互作用まで考慮に入れる「魔法波長」の概念の拡張
- 最適設計された 2 台の光格子時計による光格子時計の相互評価
- 同期比較法による、光格子時計における「量子射影雑音限界」の到達

を実証した。とりわけ最後の項目ではおよそ 10 分の積分時間で  $1.6 \times 10^{-17}$  の安定度に達し、光格子時計が、従来手法「単一イオン光時計」と比肩する性能をもつとともに、原子数の優位性を初めて実証した。この一方で、産総研の協力による光格子時計の国際原子時の高精度リンクは、光格子時計の国際比較を可能にした。この結果、Sr 光格子時計は 2006 年に秒の再定義の有力候補である「秒の二次表現」に採択された。2009 年現在、Sr 光格子時計の国際比較の不確かさは  $1 \times 10^{-15}$  に達し、事実上、現在の秒の定義である Cs 原子の不確かさに制限されるだけとなった。また産総研では  $^{171}\text{Yb}$  による光格子時計を開発し、競合する NIST グループに先駆け論文発表を行った。

光格子時計は、このプロジェクト中に十分に工学に貢献できるレベルに仕上がったと言える。この一方で、プロジェクト中には、光格子時計を国際比較し合う米国 JILA、仏国 SYRTE と Sr/Cs 原子時計の周波数比を 3 年間にわたって計測し、微細構造定数の恒常性、物理定数の重力との結合がないことを計測不確かさの範囲で示し、基礎物理学の見地からのデモンストレーションも行った。

#### 4. 事後評価結果

##### 4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果(論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)

世界トップレベルの光格子時計技術を確立した。Sr、Yb 光格子時計を実現し、光ファイバーを用いた周波数リンクも成功させた。特に、10 分の積分時間で  $1.6 \times 10^{-17}$  の周波数安定度を実現したことは極めて重要な成果と考えられる。外部発表件数は決して多くはないが、いずれの論文も質の高いものである。特許出願は一切行っていないが、光格子時計が時間標準技術として世界で共有されるためには適切な戦略であったと考えられる。事実、2006 年 10 月の国際度量衡委員会で Sr 光格子時計は「秒の二次表現として」採択された。主要な論文とその要旨を以下にまとめる。

##### <主要論文>

- 1) Opt. Lett. 34, 692, 2009, “Measuring the frequency of a Sr optical lattice clock using a 120 km coherent optical transfer”, F.-L. Hong, M. Musha, M. Takamoto, H. Inaba, S. Yanagimachi, A. Takamizawa, K. Watabe, T. Ikegami, M. Imae, Y. Fujii, M. Amemiya, K. Nakagawa, K. Ueda, and H. Katori.  
要旨:次世代の秒の定義の候補として、光格子時計がたいへん有望である。本論文は、東大、産総研及び電通大の最先端技術を結集し、120km の光周波数キャリア伝送を使って Sr 光格子時計の絶対周波数測定に成功したことを報告する。
- 2) Phys. Rev. Lett. 103, 153004, 2009, “Magic Wavelength to Make Optical Lattice Clocks Insensitive to Atomic Motion”, H. Katori, K. Hashiguchi, E. Yu. Il'inova, V. D. Ovsianikov.  
要旨:光格子時計の実現における中心的な概念である、「魔法波長」について、原子と光格子の多重極相互作用を含めた定義を与えた。この厳密な定義においては、「魔法波長」は、“atomic motion insensitive” wavelength として定義される。
- 3) J. Phys. Soc. Jpn. 75, 104302, 2009, “Improved Frequency Measurement of a One-Dimensional Optical Lattice Clock with a Spin-Polarized Fermionic  $^{87}\text{Sr}$  Isotope,” Masao Takamoto, Feng-Lei Hong, Ryouchi Higashi, Yasuhisa Fujii, Michito Imae, and Hidetoshi Katori..  
要旨:スピン偏極 1 次元光格子時計を実現し、ベクトル光シフト、ゼーマンシフトの除去手法を初めて実現。本手法は、以降の光格子時計の標準的実現手法となる。同時に、本論文は 2006 年 10 月の「秒の二次表現」の採択時に、最も不確かさの小さい  $^{87}\text{Sr}$  光格子時計の絶対周波数測定値を与えた。社団法人 日本物理学会 JPSJ 注目論文(Papers of Editors' Choice)賞受賞。
- 4) Nat. Phys. 4, 954, 2008, “Optical lattice clocks with non-interacting bosons and fermions,” Tomoya Akatsuka, Masao Takamoto, and Hidetoshi Katori.  
要旨:ボース粒子を用いる 3 次元光格子時計を世界で初めて実現した。本論文では、光格子時計の最適設計を原子の量子統計性と光格子の幾何学的設計から議論した。「ボース粒子を用いる 3 次元光格子時計」と「偏極フェルミ粒子を用いる 1 次元光格子時計」を用いた、光格子時計の比較実験を初めてデモンストレートした
- 5) Phys. Rev. Lett. 100, 053001, 2008, “Trapping of Neutral Mercury Atoms and Prospects for Optical Lattice Clocks”, H. Hachisu, K. Miyagishi, S. G. Porsev, A. Derevianko, V. D.

Ovsiannikov, V. G. Pal'chikov, M. Takamoto, and H. Katori.

要旨:水銀原子は黒体輻射シフトが少なく初来有望な光格子時計候補である。本論文では、世界で初めて水銀原子のレーザー冷却、トラップを実現するとともに、水銀原子光格子時計の特性の理論的予測をした。

- 6) Phys. Rev. Lett. 100, 140801, 2008, “New Limits on Coupling of Fundamental Constants to Gravity Using  $^{87}\text{Sr}$  Optical Lattice Clocks”, S. Blatt, A. D. Ludlow, G. K. Campbell, J. W. Thomsen, T. Zelevinsky, M. M. Boyd, J. Ye, X. Baillard, M. Fouche, R. L. Targat, A. Bruschi, P. Lemonde, M. Takamoto, F. L. Hong, H. Katori and V. V. Flambaum

要旨: Sr 光格子時計を実現している、米国、仏国、我々のグループで、3年間にわたり Sr/Cs 原子時計の周波数比較を行った。これにより、微細構造定数の揺らぎ、微細構造定数と重力の結合についての制限値を議論した。

- 7) Phys. Rev. Lett. 102, 063002, 2009, "Prospects for Optical Clocks with a Blue-Detuned Lattice" M. Takamoto, H. Katori, S. I. Marmo, V. D. Ovsiannikov, and V. G. Pal'chikov.

要旨: 高次の光シフトを低減する青方離調の魔法波長を提案し、Sr 原子に対しその魔法波長を決定した。青方離調魔法波長における、4 次の光シフトの寄与、2光子イオン化レートについての理論的検討を行った。

- 8) Appl. Phys. Express 2, 072501, 2009, “One-Dimensional Optical Lattice Clock with a Fermionic  $^{171}\text{Yb}$  Isotope”, Takuya Kohno, Masami Yasuda, Kazumoto Hosaka, Hajime Inaba, Yoshiaki Nakajima and Feng-Lei Hong.

要旨: 世界で初めて  $^{171}\text{Yb}$  光格子時計の絶対周波数決定について報告したものである。本論文を根拠にメートル条約関連会議において「メートルを実現する放射」の一つに採択された。これにより、Yb 光格子時計が「秒の二次表現」として採択される道を開いた。

- 9) J. Phys. Soc. Jpn. 78, 013301, 2009, “Coherence of Spin-Polarized Fermions Interacting with a Clock Laser in a Stark-Shift-Free Optical Lattice” Masao Takamoto and Hidetoshi Katori.

要旨: 高純度のスピン偏極は1次元光格子時計の衝突シフトを低減するために極めて重要である。本論文では、このための手法を提案し、99%のスピン偏極度を得た。

- 10) Opt. Express 16, 16459, 2008, “Coherent optical frequency transfer over 50-km physical distance using a 120-km-long installed telecom fiber network”, Mitsuru Musha, Feng-Lei Hong, Kenichi Nakagawa, and Ken-ichi Ueda.

要旨: つくば-東大間 120km の光ファイバーに対して、位相補償による雑音抑制を施した。その結果、ほぼ理論限界の雑音抑制が達成され、周波数安定度を表すアラン分散が 1 秒の平均時間において  $8 \times 10^{-16}$  に達した。

次に主な受賞リストを以下にまとめる。

#### <主な受賞>

1. 香取秀俊, Julius Springer for Applied Physics 2005, Tucson, USA, “超精密光時計開発における先駆的な貢献,” 2005年10月17日.
2. 香取秀俊, 財団法人丸文研究交流財団 丸文学術特別賞, “「光格子時計」手法による超高精度原子時計の実現,” 2006年9月30日.
3. 高本将男, 洪鋒雷, 東亮一, 藤井靖久, 今江理人, 香取秀俊, 社団法人日本物理学会 JPSJ 注目論文(Papers of Editors' Choice)賞, 論文タイトル: Improved Frequency Measurement of a One-Dimensional Optical Lattice Clock with a Spin-Polarized Fermionic  $^{87}\text{Sr}$  Isotope, 掲載誌: J. Phys. Soc. Jpn., 75, 104302 (2006), 2006年10月10日.

4. 香取秀俊, 第 20 回 日本 IBM 科学賞, “超高精度原子時計を実現する「光格子時計」の開発,” 2006 年 10 月 26 日.
5. 香取秀俊, IEEE International Frequency Control Symposium, 2008 RABI AWARD, “光格子時計の発明と開発における傑出した貢献に対して,” 2008 年 5 月 19 日.
6. 香取秀俊, 第 42 回 市村学術賞・特別賞, “光格子時計の提案・実証による新たな原子時計手法の確立,” 2010 年 4 月 28 日.
7. 河野託也, 安田正美, 保坂一元, 稲場肇, 中嶋善晶, 洪鋒雷, 第 32 回応用物理学会優秀論文賞, 「One-Dimensional Optical Lattice Clock with a Fermionic  $^{171}\text{Yb}$  Isotope」, 掲載誌: Appl. Phys. Express 2 072501 (2009), 2010 年 9 月 14 日.

#### 4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

時間標準という基礎科学の分野でも産業技術の分野でも重要な技術で世界をリードしている。特に今後目標としている  $10^{-18}$  の精度を持つ光時計が実現されれば、時計の概念は一変され測地学への応用、GPS の高精度化など社会へ大きなインパクトを持つものと予想される。

#### 4-3. 総合的評価

チームリーダーの創出したアイデアが具体的な成果として実現され、世界で20以上の研究グループがこの技術に取り組んでいる中で、常にトップを走り続けている点で、本CREST領域の中でも突出して優れた成果と考えられる。

当初は、光格子時計とシュタルク原子チップの2つを研究の柱に据えていたが、途中から光格子時計の研究に的を絞ったが、結果的には良い判断であった。

チームリーダーには、更に大きなスケールで野心的な研究を発展させて頂きたい。香取 ERATO プロジェクトの中で、一回り大きな研究指導者としてこれまで以上に腕をふるって頂きたい。